12

Álgebra de imágenes

Introducción

Con el objetivo de poner de manifiesto ciertos rasgos de la imagen que pueden quedar enmascarados con la abundancia de datos, o bien con el fin de destacar algún otro tipo de información poco evidente o incluso aparentemente oculta, se pueden realizar operaciones algebraicas entre bandas de una misma imagen o entre imágenes diferentes. Mediante el álgebra de bandas o de imágenes se sintetiza en un solo valor información procedente de varias o de todas las bandas de la imagen.

Las transformaciones globales, es decir, aquellas en las que *toda* la imagen resultante depende de *toda* la imagen o imágenes originales, se basan en el álgebra. En general, el álgebra de imágenes proporciona nuevas imágenes con bandas obtenidas a partir combinaciones lineales de las bandas originales.

Existen multitud de operaciones que pueden realizarse con imágenes o con bandas de ellas, orientadas cada una a un objetivo concreto. En esta lección se estudiarán el análisis de componentes principales, la transformación *Tasseled Cap*, los cocientes de bandas y, como caso particular de ellos, los índices de vegetación.

Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales (ACP) o transformación a componentes principales es una técnica estadística multivariante muy utilizada para definir la mejor combinación de nuevas bandas capaz de conservar la mayor parte de la información de la imagen completa.

El ACP busca los ejes de mayor variabilidad e información de la imagen y es de gran utilidad para los estudios multitemporales, o para seleccionar tres nuevas bandas para una composición en color que concentren más información que cualesquiera de las originales.

La distribución de niveles digitales en una banda de una imagen multiespectral puede considerarse una variable aleatoria y, como tal, puede someterse a cualquiera de las técnicas estadísticas habituales

La función de densidad univariante de la distribución de los ND es en realidad el histograma de cada banda. Para facilitar el trabajo con los datos, dicha distribución pue asimilarse a una distribución normal. De esta forma, la distribución de los ND cada banda queda caracterizada completamente por sólo dos parámetros: la media y la varianza de sus datos.

A su vez, considerada la imagen multiespectral completa, los ND multiespectrales pueden considerarse como una variable aleatoria vectorial multivariante y cada banda constituye una componente del vector. La función de densidad multivariante es ahora el histograma multiespectral de la imagen y el equivalente

multiespectral del valor promedio es el vector de medias.

La relación entre bandas está caracterizada por las covarianzas o los correspondientes coeficientes de correlación.

En una imagen multiespectral, el vector

$$\vec{z} = \left(z_1, z_2, \cdots, z_n\right) \tag{1}$$

Se denomina *vector de características* y representa de forma vectorial los ND de las n bandas de la imagen.

Dentro de una determinada banda K, el valor medio es:

$$\mu_k = \sum_{i,j} \frac{z_{ij(k)}}{N} \tag{2}$$

en donde N es el número de celdas de la banda, igual al producto del número de columnas por el de líneas.

La varianza de esa banda es:

$$\sigma^2{}_k = \sum_{i,j} \frac{\left(z_{ij(k)} - m_k\right)^2}{N} \tag{3}$$

La covarianza entre dos bandas K y L es:

$$\sigma_{k,l} = \sum_{i,j} \frac{\left[z(i,j)_k - m_k\right]\left[z(i,j)_l - m_l\right]}{N} \tag{4}$$

Y conviene recordar que $\sigma_{k,l} = \sigma_{l,k}$ y que $\sigma_{k,k} = \sigma_k^2$, esto es, la varianza de la propia banda.

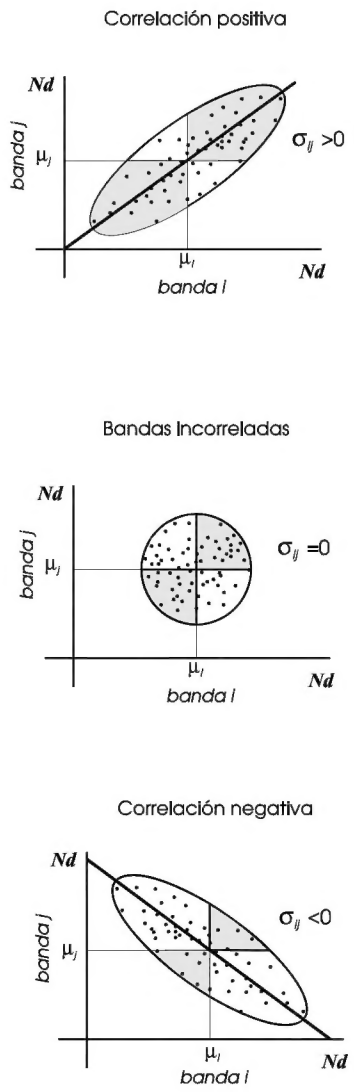
Finalmente, el coeficiente de correlación entre esas dos bandas es:

$$\rho_{k,l} = \frac{\sigma_{k,l}}{\sqrt{\sigma_{k,k}\sigma_{l,l}}} = \frac{\sigma_{k,l}}{\sqrt{\sigma^2{}_k \sigma^2{}_l}} = \frac{\sigma_{k,l}}{\sigma_k \sigma_l} \tag{5}$$

La varianza de una banda es una medida de la dispersión de sus ND en torno al valor medio y representa el contraste de la imagen en esa banda. Visto desde otro punto de vista, es una buena medida de la cantidad de información que proporciona esa banda. Por su parte, la covarianza y el coeficiente de correlación entre dos bandas indican el grado de relación que hay entre ambas, este último de forma normalizada entre -1 y 1. Las bandas correladas muestran distribuciones de sus hiperelipsoides de puntos en el espacio de características alargadas. En las incorreladas, sin embargo, las nubes presentan simetría con respecto a ejes paralelos a los de coordenadas, aunque no necesariamente tienen que tener forma esférica o hiperesférica.

Considerando las n bandas de la imagen, se pueden definir las matrices de covarianza (6) y de correlación (7), ambas de dimensión $n \times n$ y simétricas:

$$\mathbf{\Sigma} = \begin{bmatrix} \sigma^2{}_1 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma^2{}_2 & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma^2{}_n \end{bmatrix} \tag{6}$$



Correlación entre bandas.

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix} 1 & \rho_{12} & \dots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & 1 & \dots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{7}$$

La matriz de covarianzas de un conjunto de bandas linealmente independientes es una matriz diagonal, porque todas las covarianzas son nulas.

Por lo tanto, si se quiere obtener un conjunto de bandas linealmente independientes a partir de otro conjunto cuyas bandas no lo son, hay que buscar una transformación que consiga diagonalizar la matriz de covarianzas de este último.

Diagonalización de la matriz de covarianzas

Dada una matriz de transformación **A**, se denominan vectores propios o autovectores de **A** a los que son colineales con sus transformados:

$$\mathbf{A}\vec{\mathbf{X}}=\lambda\vec{\mathbf{X}} \tag{8}$$

También se puede escribir:

$$\mathbf{A}\vec{X}=\lambda\mathbf{I}\vec{\mathbf{X}} \tag{9}$$

Siendo **I** la matriz identidad:

$$\mathbf{I}=\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

La expresión (9) se puede poner de la forma:

$$(\mathbf{A}-\lambda\mathbf{I})\vec{\mathbf{X}}=0 \tag{11}$$

Y para que esta ecuación se verifique, se requiere resolver la ecuación característica que proporciona los valores propios de la matriz **A** igualando a cero el determinante:

$$\phi(\lambda)\equiv \quad |\mathbf{A}-\lambda\mathbf{I}|=0 \tag{12}$$

Particularizando para la matriz de covarianzas, la ecuación característica sería:

$$\phi(\lambda)\equiv|\mathbf{\Sigma}-\lambda\mathbf{I}|=0 \tag{13}$$

Que, desarrollada, quedaría:

$$|\mathbf{\Sigma}-\lambda\mathbf{I}|=\left|\begin{pmatrix} \sigma^2_1 & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma^2_2 & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma^2_n \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \lambda & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda \end{pmatrix}\right|=$$

$$=\begin{vmatrix} \sigma^2_1-\lambda & \sigma_{12} & \dots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma^2_2-\lambda & \dots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \dots & \sigma^2_n-\lambda \end{vmatrix}=0 \tag{14}$$

Resolviendo la ecuación característica se obtienen n soluciones $\lambda_1, \lambda_2, \cdots, \lambda_n$, que son los valores propios o autovalores de la citada matriz, los cuales habitualmente se ordenan de forma que $\lambda_1 > \lambda_2 > \cdots > \lambda_n$.

Los vectores propios se obtienen resolviendo para cada valor propio la expresión:

$$\mathbf{\Sigma}\vec{\mathbf{X}}_i = \lambda_i \vec{\mathbf{X}}_i \tag{15}$$

es decir:

$$\begin{bmatrix} \sigma^2_1 & \sigma_{12} & \cdots & \sigma_{1n} \\ \sigma_{21} & \sigma^2_2 & \cdots & \sigma_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{n1} & \sigma_{n2} & \cdots & \sigma^2_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \vdots \\ x_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_i\, x_{i1} \\ \lambda_i\, x_{i2} \\ \vdots \\ \lambda_i\, x_{in} \end{bmatrix} \tag{16}$$

Y la transformación que diagonaliza la matriz de covarianzas es:

$$\mathbf{P}^{-1}\,\mathbf{\Sigma}\,\mathbf{P} = \mathbf{\Lambda} \tag{17}$$

donde **P** es una matriz de paso constituida por los vectores propios puestos por columnas en el mismo orden que los valores propios asociados a cada uno de ellos:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{21} & \cdots & x_{n1} \\ x_{12} & x_{22} & \cdots & x_{n2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & x_{2n} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \tag{18}$$

y **Λ** es la matriz diagonal conformada con los valores propios ordenados:

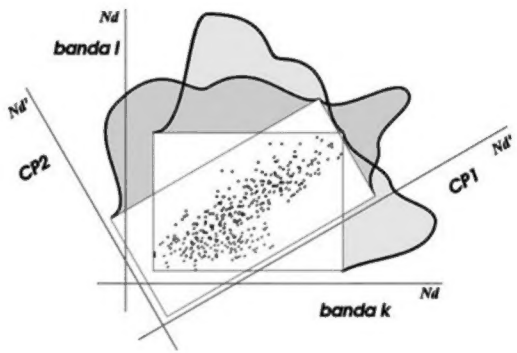
$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix} \tag{19}$$

La demostración de (17) es trivial, pero queda fuera del alcance de este texto.

Es interesante y, en el caso del análisis digital de imágenes, muy importante considerar que la transformación a componentes principales es una transformación ortogonal, es decir, la traza de **Σ** es igual a la de **Λ**:

$$\sum_{i=1}^{n} \sigma_i^2 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \tag{20}$$

lo que quiere decir que la varianza, es decir, la información, se redistribuye sin pérdidas entre los componentes principales. Además, a la primera componente le corresponde la mayor parte de la varianza de la imagen. De la varianza restante, su mayor parte queda explicada por la siguiente componente, y así sucesivamente. Dicho de otro modo, las nuevas bandas, llamadas ahora componentes principales contienen toda la información original, pero sin redundancia entre ellas, y están ordenadas de mayor a menor grado de información.



Cambio de base en la transformación ACP. Dos bandas correladas dejan de estarlo si se las somete a un giro en el espacio de características de modo que los nuevos ejes, componentes principales, se orienten según los vectores propios de la distribución original.

Utilidad en teledetección

El ACP es utilizado en el análisis digital de imágnes para mejorar el análisis visual al introducir prácticamente toda la información de la imagen en la composición en color, que solamente puede hacer uso de tres bandas, si bien hay que tener en cuenta que el peso de información que se le da a cada canal es diferente, puesto los componentes principales retienen cantidades diferentes de varianza.

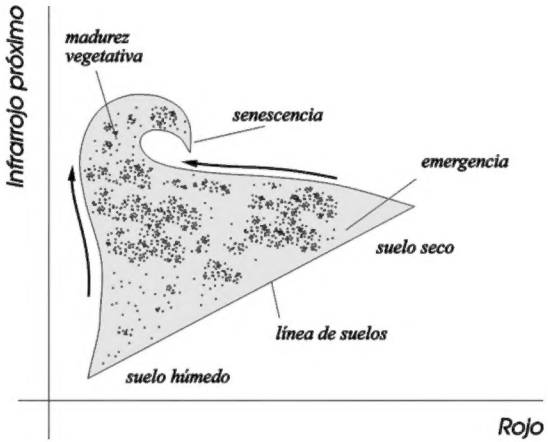
En teledetección multitemporal es muy útil para estudiar de series temporales. El procedimiento que suele seguirse es el siguiente. Se extrae el primer componente principal de las bandas de la imagen de

cada una de las fechas. Posteriormente se realiza una clasificación con los CP. Quedarán al descubierto las áreas de la imagen que muestren diferencias entre unos componentes y otros, o lo que es lo mismo, evolución entre fechas diferentes.

Para la detección de cambios entre dos fechas, se transforman a CP el conjunto de todas las bandas de ambas fechas. Las primeras CP explicarán la mayor parte de la varianza de la imagen, y por tanto incluirán todos los aspectos comunes a las dos fechas. Las componentes secundarias contendrán información sobre aquellos fenómenos que no puedan explicarse en las dos fechas simultáneamente, por lo que indicarán la evolución de los mismos. Las últimas componentes principales retienen la información espuria de la imagen, esto es, el ruido.

Transformación *tasseled cap*

Se denomina diagrama de dispersión a la representación de la nube de puntos espectral, esto es, de niveles digitales o de las magnitudes físicas de reflectancia o radiancia, en un espacio espectral o de características de dos o más dimensiones. Lógicamente, sobre un papel solamente pueden representarse diagramas de dispersión bidimensionales, pero un sistema informático no tiene el menor problema para procesar diagramas *n*-dimensionales.



Evolución espectral de un suelo de cultivo

Evolución espectral de los terrenos cultivados

Se puede estudiar la posición espectral de las celdas de terreno cultivado en un diagrama de dispersión desde el estado de nascencia hasta la madurez y el agostamiento del cultivo. A lo largo de su período vegetativo el rastro que va dejando la nube de puntos en su evolución espectral en un espacio tridimensional adquiere la forma de un gorro borlado (*tasseled cap*). Si solo se consideran las bandas del infrarrojo próximo y del rojo espectral, la base del gorro está definida por la línea de suelos, a lo largo de la cual se distribuyen los distintos tipos de suelos, de acuerdo a su estado (humedad e iluminación, fundamentalmente).

A medida que el cultivo se desarrolla y llega a su pleno vigor, los puntos tienden a aproximarse al eje del infrarrojo, alejándose de la línea de suelos. Cuando se inicia el período de senescencia, la nube de puntos va convergiendo hacia un punto único, que alcanza cuando el cultivo llega al estado de marchitez permanente, y cuya posición tiende a regresar de nuevo a la línea de suelos.

La transformación *tasseled cap* (TCT, *Tasseled Cap Transformation)* es una herramienta que permite comprimir la información espectral de una imagen en pocas bandas asociadas a ciertas características de la escena, sin perder información significativa. Consiste en un giro en el espacio espectral mediante el cual se pone de manifiesto la evolución espectral de los cultivos anuales o bienales, desde su nascencia hasta la madurez, el agostamiento y la marchitez final.

Tras el giro, los nuevos ejes en un espacio espectral tridimensional representan las variables *brillo*, *verdor* y *humedad*. Los ejes brillo y verdor definen el plano de la *vegetación* y los ejes brillo y humedad, el de los *suelos*.

Esta transformación es empírica y se aplica con diferentes matrices a cada imagen de satélite, dependiendo del número de bandas y de la longitud de onda de cada una de ellas. En los ejemplos siguientes se muestran las transformaciones sobre Landsat-TM y sobre Landsat 8-OLI:

TM:

$$\begin{bmatrix} brillo \\ verdor \\ humedad \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3037 & 0,2793 & 0,4743 & 0,5585 & 0,5082 & 0,1863 \\ -0,2848 & -0,2435 & -0,5436 & 0,7243 & 0,0840 & -0,1800 \\ 0,1509 & 0,1973 & 0,3279 & 0,3406 & -0,7112 & -0,4572 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} TM1 \\ TM2 \\ TM3 \\ TM4 \\ TM5 \\ TM7 \end{bmatrix}$$

OLI:

$$\begin{bmatrix} Brillo \\ Verdor \\ Humedad \\ TCT4 \\ TCT5 \\ TCT6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,3029 & 0,2786 & 0,4733 & 0,5599 & 0,5080 & 0,1872 \\ -0,2941 & -0,2430 & -0,5424 & 0,7276 & 0,0713 & -0,1608 \\ 0,1511 & 0,1973 & 0,3283 & 0,3407 & -0,7117 & -0,4559 \\ -0,8239 & 0,0849 & 0,4393 & -0,0580 & 0,2013 & -0,2773 \\ -0,3294 & 0,0557 & 0,1056 & 0,1855 & -0,4349 & 0,8085 \\ 0,1079 & -0,9023 & 0,4119 & 0,0575 & -0,0259 & 0,0252 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} OLI2 \\ OLI3 \\ OLI4 \\ OLI5 \\ OLI6 \\ OLI7 \end{bmatrix}$$

Como puede verse en ambas, los coeficientes de las matrices de giro buscan ponderar equilibradamente todas las bandas para buscar la componente brillo. En cambio, enfatizan el contraste que existe entre el infrarrojo próximo y el visible, particularmente el rojo, para deducir la componente verdor. Finalmente, la humedad queda expresada contraponiendo los canales del infrarrojo medio contra los demás.

La primera es obvia. El verdor se basa en la diferencia de reflectancia que existe entre el infrarrojo próximo y el rojo si la vegetación es vigorosa y el contenido en clorofila fotosintéticamente activa es alto. Por último, son muy características de la molécula de agua sus bandas de absorción en diversos intervalos del espectro en el infrarrojo medio.

Índices de vegetación

En la superficie sólida del planeta solamente caben encontrar unos cuantos tipos de superficies genéricas: o bien se trata de suelo desnudo, o bien de vegetación, o de la mezcla de ambos en cualquier proporción, o bien es agua en estado sólido o en masas líquidas. Los índices de vegetación son elementos adecuados para caracterizar el tipo de cubierta y sintetizar la información en una sola banda. Además, son útiles para deducir otras variables de gran trascendencia en los estudios físicos de la superficie, como es el caso de la emisividad.

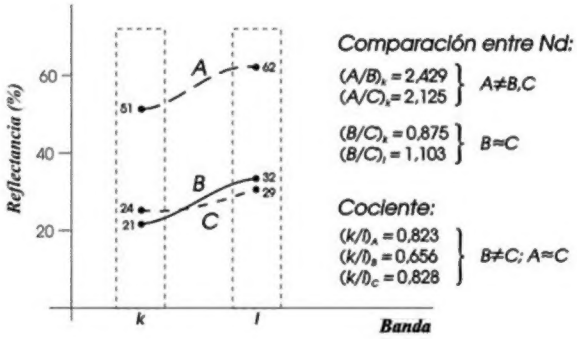
Cocientes de bandas

Los cocientes son transformaciones consistentes en dividir celda a celda todos los ND pertenecientes a una banda por los de otra. El caso más general puede expresarse:

$$z' = C_0 + C_1 \frac{(z_k + a)}{(z_l + b)} \qquad (21)$$

aunque no necesariamente hay que añadir constantes aditivas.

En ciertas ocasiones, los cocientes proporcionan ventajas en la interpretación de las imágenes. Cuando es difícil discriminar entre dos cubiertas cuyos ND en varias bandas son muy similares, el cociente entre ellas puede ofrecer un mejor criterio de separabilidad.



Comparación directa de ND y de sus cocientes.

Para la misma irradiancia extraterrestre, el relieve origina gradientes de irradiancia local y, en consecuencia, niveles variables de radiancia que son independientes de la ocupación de suelo y que, además, afectan a todas las bandas de la imagen. Por el contrario, el cociente entre bandas independiza de la irradiancia la interpretación de los resultados. En consecuencia, es una transformación muy indicada para reducir el efecto radiométrico del relieve en la imagen final.

Por ejemplo, en igualdad de condiciones de iluminación, las coníferas siempre son más reflexivas que las caducifolias, tanto en el visible como en el infrarrojo próximo. En cambio, una conífera en sombra brilla menos que una caducifolia al sol. El cociente IRp/R soluciona esta cuestión. Este cociente es un índice de vegetación.

Índices de vegetación

Los índices de vegetación son transformaciones sencillas y rápidas cuyo objetivo es realzar las zonas cubiertas por material fotosintéticamente activo, maximizando la contribución espectral inherente a la cubierta vegetal, en tanto que minimizan la influencia de otros factores que pueden distorsionar la interpretación, como pueden ser el tipo de suelo, la irradiancia solar, etc.

Existen dos grandes grupos de índices de vegetación, los que se basan en transformaciones ortogonales y los basados en cocientes entre bandas.

Los índices basados en trasformaciones recurren a giros en el espacio espectral IRp/R. Para construir el Índice de Vegetación Perpendicular (PVI, Perpendicular Vegetation Index), uno de los nuevos ejes queda orientado según la dirección de la línea de suelos, y el otro perpendicularmente a ella. El PVI mide la distancia espectral entre el vector de características de la celda estudiada y la línea de suelos:

$$PVI = \sqrt{\left[\rho(IRp_v) - \rho(IRp_s)\right]^2 + \left[\rho(R_v) - \rho(R_s)\right]^2} \quad (22)$$

donde ρ es la reflectancia en los canales IRp y R y los subíndices *v* y *s* se refieren a las celdas con vegetación y a las de suelo desnudo. En general, las celdas ocupadas por suelo desnudo tendrán PVI=0, las ocupadas por agua podrán tener PVI<0 y las cubiertas por vegetación tendrán valores de PVI positivos y tanto mayores cuando más vigorosa sea la vegetación de la celda.

Es un rasgo muy característico de la vegetación a medida que cubre el suelo una disminución progresiva de la reflectancia en el visible, particularmente en el rojo espectral debido a la absorción de la luz por parte de los pigmentos fotosintéticos, especialmente la clorofila, y un aumento simultáneo de la reflectancia en el infrarrojo próximo. Además, las líneas de isocobertura, para distintos tipos de atmósfera se van inclinando a medida que el cultivo crece y madura.

Un índice que proporciona información acerca de la cantidad de masa foliar en un determinado punto es el índice de área foliar (LAI, Leaf Area Index) que es la proporción de suelo cubierto eficazmente por hojas u otro material vegetal. Conforme se desarrolla una cubierta vegetal, su índice foliar se incrementa hasta llegar a un máximo (próximo a la floración). A partir de entonces decrece hasta alcanzar el punto de marchitez permanente. Durante el crecimiento del cultivo la contribución reflectora del suelo va disminuyendo. El LAI puede superar ampliamente la unidad.

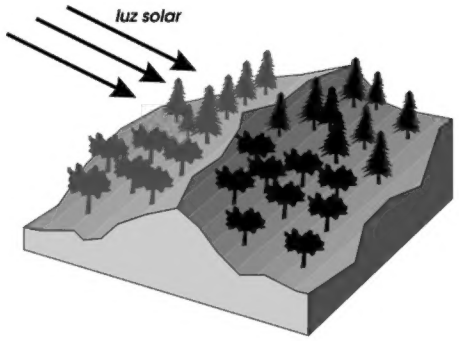
Entre los índices basados en cocientes, los más utilizados consisten en los que combinan bandas del infrarrojo próximo con las del visible y se basan, como se ha dicho en la alta reflectancia de la vegetación en el IRp y la baja en el VIS, especialmente en el rojo. El más simple de los índices VIS-IRp es el Índice de Vegetación de la Razón RVI (*Ratio Vegetation Index*):

$$RVI = \frac{\rho_{IRp}}{\rho_R} \quad (23)$$

elaborado con los cocientes celda a celda de las bandas IRp y R de la imagen. Si bien este índice muestra claramente la relación entre las relectancias de las bandas citadas tiene el inconveniente de no estar acotado y tender a valores muy altos cuando el denominador es pequeño, razón por la cual no son fáciles las comparaciones. Por esta razón se prefiere *normalizar* el índice y elaborar el denominado Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*):

$$NDVI = \frac{\rho_{IRp} - \rho_R}{\rho_{IRp} + \rho_R} \quad (24)$$

La ventaja de este índice es que está acotado entre -1 y 1. Superficies sin vegetación proporcionan valores de NDVI próximos a cero, tanto positivos como negativos. Valores altos de NDVI indican celdas con alto contenido en vegetación vigorosa y fotosintéticamente activa. Valores francamente negativos de



Nd		*Caducifolias*		*Coníferas*	
		sol	sombra	sol	sombra
Banda	R	89	49	96	53
	IRp	124	68	173	95
	IRp/R	**1,393**	**1,388**	**1,802**	**1,792**

Problemas en la interpretación de la cobertura de una imagen si coexisten laderas bien y mal iluminadas.

NDVI pueden indicar superficies de agua o cubiertas nubosas.

Es importante hacer notar que tanto éste como el resto de los índices están definidos y se calculan con las reflectancias, no con los niveles digitales directamente.

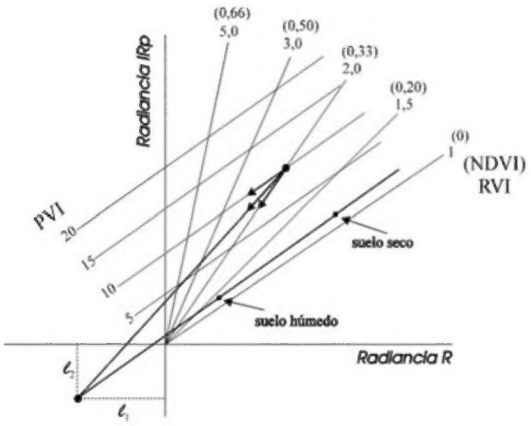
Directamente relacionado con el anterior está el índice de vegetación transformado TVI (*Transformed Vegetation Index*):

$$TVI = \sqrt{|NDVI + 0,5|} \qquad (25)$$

que evita los valores negativos del NDVI. La introducción de la raíz cuadrada persigue asemejar la distribución de valores a una distribución normal. No hay grandes diferencias entre los resultados obtenidos con con NDVI y TVI. Se suele tomar el umbral $\sqrt{2}/2$ para delimitar las áreas de vegetación. Valores superiores a esta cifra indican cobertura vegetal.

Corrección de la influencia del suelo

En numerosas ocasiones la vegetación no tapiza completamente el suelo y el índice que se calcule puede no reflejar fielmente el estado vegetativo de la cubierta simplemente por el hecho de estar la radiancia contaminada por el efecto del suelo subyacente. Esto sucede tanto en cultivos herbáceos en hilera como en cultivos leñosos, pero también es frecuente en bosques del tipo mediterráneo donde la cabida cubierta es escasa y entre árboles y arbustos se deja ver el suelo desnudo. En estos casos ha de recurrirse a procedimientos que minimicen ese efecto del suelo parcialmente cubierto.



Evolución espectral de una celda con la humedad.

La evolución espectral de una celda que paulatinamente aumenta su humedad en un diagrama IRp/R es contradictoria en función de qué tipo de índice se utilice: si se utiliza el PVI, el desplazamiento se realizará según líneas paralelas a la línea de suelo, puesto que el contenido de material vegetal es invariable. Sin embargo, si se utiliza el criterio del RVI o del NDVI, la celda tiende hacia el origen de coordenadas.

El índice de vegetación ajustado al suelo, SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) proporciona una solución de compromiso entre ambas situaciones y reúne características comunes a los anteriores. El punto de convergencia de la bisectriz de cada par de isolíneas con la línea de suelo está en ($-\ell_1$, $-\ell_2$), y de valores experimentales se deduce que habitualmente ($\ell_1 \approx \ell_2 \approx 0,25$ unidades de reflectancia. Para eliminar los valores negativos en el diagrama IRp/R se traslada el origen a la posición ($-\ell_1$, $-\ell_2$), obeniéndose un NDVI desplazado:

$$NDVI_{desplazado} = \frac{(\rho_{IRp} + \ell_2) - (\rho_R + \ell_1)}{(\rho_{IRp} + \ell_2) + (\rho_R + \ell_1)}$$

Si se particulariza este índice para los valores de intersección de la prolongación de la línea de suelos y la bisectriz de los pares de isolíneas ($\ell_1 \approx \ell_2 \approx 0,25$) y se multiplica por una constante que homologue su intervalo de existencia al del NDVI se tiene finalmente:

$$SAVI = \frac{\rho_{IRp} - \rho_R}{\rho_{IRp} + \rho_R + L} \cdot (1 + L) \qquad (26)$$

Donde L adquiere el valor 1 para baja proporción de vegetación, 0,5 para una cobertura intermedia y 0,25 para alto contenido de vegetación.

Otros índices de vegetación

Existen otros muchos índices de vegetación relacionados o derivados de los anteriores, apropiados cada uno de ellos para circunstancias defendidas por sus autores respectivos. A continuación se muestra una mínima parte de la que los investigadores han ido desarrollando a lo largo de los últimos años.

- SAVI modificado:

$$MSAVI = \frac{2\rho_{IRp} + 1 - \sqrt{\left[2\rho_{IRp} + 1\right]^2 - 8\left[\rho_{IRp} - \rho_R\right]}}{2} \qquad (27)$$

- SAVI transformado:

$$TSAVI = \frac{a\left[\rho_{IRp} - a\,\rho_R - b\right]}{\rho_R + a\,\rho_{IRp} - ab + X\left(1 + a^2\right)} \qquad (28)$$

donde a es la pendiente de la línea de suelos, b es la ordenada en el origen de dicha línea y $X \approx 0{,}08$ es un parámetro a determinar según el tipo de cultivo.

- GEMI (*Global Environment Monitoring*):

$$GEMI = \frac{\eta\left(1 - 0{,}25\eta\right) - \left(\rho_R - 0{,}125\right)}{1 - \rho_R} \qquad (29)$$

Donde:

$$\eta = \frac{2\left(\rho_{IRp}^2 - \rho_R^2\right) + 1{,}5 \cdot \rho_{IRp} + 0{,}5 \cdot \rho_R}{\rho_{IRp} + \rho_R + 0{,}5}$$

- GESAVI (*Generalized SAVI*):

$$GESAVI = \frac{\rho_{IRp} - a\,\rho_R - b}{\rho_R + Z} \qquad (30)$$

donde a y b son respectivamente la pendiente y la ordenada en el origen de la línea de suelos en un diagrama IRp/R:

$$(IRp_{suelo} = aR_{suelo} + b)$$

Z hace referencia al valor absoluto de la abscisa del punto de corte de las isolíneas de vegetación con la línea de suelo. Un valor empírico adecuado es Z=0,35.

- OSAVI (*Optimized SAVI*):

$$OSAVI = \frac{\rho_{IRp} - \rho_R}{\rho_{IRp} + \rho_R + Y}\left(1 + Y\right) \qquad (31)$$

donde Y es un parámetro de ajuste de valor 0,16. Para bajos valores de LAI, el OSAVI independiza el resultado del suelo subyacente muy eficazmente. Se utiliza sobre todo para el cálculo de la biomasa sobre el suelo, nivel de nitrógeno en hoja y contenido de clorofila, Este índice equivale al TSAVI con a=1 y b=0.

- ARVI (*Atmosferically Resistant Vegetation Index*):

$$ARVI = \frac{\rho_{IRp} - \left[2\rho_R - \rho_A\right]}{\rho_{IRp} + \left[2\rho_R - \rho_A\right]} \qquad (32)$$

en cuya expresión, ρ_A es la reflectancia en el azul espectral.

- *CARI* (*Chlorophyll Absorption Ratio Index*):

$$CARI = \frac{|a \cdot 670 + \rho_{670} + b|}{\sqrt{a^2+1}} \frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \tag{33}$$

con $a = \frac{\rho_{700} - \rho_{500}}{150}$; $b = \rho_{550} - (a \cdot 550)$

Este índice minimiza el efecto de los materiales no fotosintéticos en la cubierta vegetal.

- *MCARI* (*CARI modificado*):

$$MCARI = \frac{2,5(\rho_{800} - \rho_{670}) - 1,3(\rho_{800} - \rho_{550})}{\sqrt{(2\rho_{800}+1)^2 - (6\rho_{800} - 5\rho_{670}) - 0,5}} \cdot 1,5 \tag{34}$$

El *MCARI* es más sensible a la concentración de clorofila en las hojas.

- *TCARI* (*CARI transformado*):

$$TCARI = 3 \cdot \left[(\rho_{700} - \rho_{670}) - 0,2 \cdot (\rho_{700} - \rho_{550}) \frac{\rho_{700}}{\rho_{670}} \right] \tag{35}$$

Mejora la sensibilidad ante bajos contenidos en clorofila.

- Índice de suma verde *SGI* (*Sum Green Índex*):

Es un índice hiperespectral muy simple sensible a pequeños cambios en la densidad del dosel vegetal y, por tanto, válido para hacer el seguimiento de las cubiertas forestales. Consiste en calcular el promedio de la reflectancia en el intervalo espectral comprendido entre 500 y 600 nm.

$$SGI = \frac{\sum_{\lambda=500}^{600} \rho_\lambda}{N} \tag{36}$$

Con valores $0 \leq SGI \leq \sim 50\,\%$ en porcentaje de reflectancia. Para la vegetación verde el rango más común es del 10 al 25 %.

Índices de humedad

Al igual que mediante cocientes se puede determinar el contenido en vegetación fotosintéticamente activa en una celda de imagen, también existen índices similares para medir el contenido de humedad. Dos índices representativos de ello son los siguientes, para cuyo cálculo se necesita conocer la reflectancia en ciertas bandas muy estrechas del espectro, lo que obliga a utilizar información hiperespectral.

- WBI (*Water Band Index*):

$$WBI = \frac{\rho_{900}}{\rho_{970}} \tag{37}$$

La absorción alrededor de 970 nm aumenta en relación a la de 900 nm cuando aumenta el contenido de agua del dosel vegetal. Este índice se aplica al análisis de estrés hídrico de la vegetación, a la predicción de la producción, al análisis de riesgo de incendio, y en general en la gestión agrícola y en estudios medioambientales. Rangos habituales para la vegetación verde son de 0,8 a 1,2.

- NDWI (*Normalized difference Water Index*):

$$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{1241}}{\rho_{857} + \rho_{1241}} \tag{38}$$

El NDWI es sensible a los cambios en la humedad de la vegetación. La dispersión de la luz por el dosel vegetal favorece la absorción del agua en 1241 nm. Se aplica al análisis de estrés del dosel forestal, al estudio del LAI áreas de vegetación densa, a los modelos de productividad vegetal y al riesgo de incendios. El NDWI está acotado entre -1 y 1, y sus valores usuales para la vegetación verde son de -0,1 a 0,4.

- MSI (*Moisture Stress Index*):

$$MSI = \frac{\rho_{1599}}{\rho_{819}} \tag{39}$$

El MSI es sensible al incremento de la humedad foliar. La absorción en 1599 nm aumenta con el contenido de agua y en cambio la registrada en 819 nm permanece prácticamente invariable. Este índice se aplica al análisis de estrés vegetal, a la predicción de cosecha, al estudio de los riesgos de incendio y en estudios ambientales. La interpretación del MSI es inversa en relación con otros índices: valores más altos indican mayor estrés hídrico. El rango puede oscilar entre 0 y más de 3, siendo usuales para la vegetación verde valores entre 0,4 y 2.

- NDII (*Normalized Difference Infrared Index*):

$$NDII = \frac{\rho_{819} - \rho_{1649}}{\rho_{819} + \rho_{1649}} \tag{37}$$

El NDII es sensible a los cambios en el contenido de agua de la cubierta vegetal. Sus valores aumentan con el contenido de agua. Sus aplicaciones principales son la gestión agrícola y forestal y la detección de estrés hídrico de la vegetación. Al igual que el NDWI, sus valores están acotados entre -1 y 1, y los más comunes para la vegetación verde están comprendidos entre 0,02 y 0,6.

Índice de área quemada

Se han desarrollado también índices basados en cocientes para calcular la severidad de los incendios forestales. Uno representativo es el siguiente.

- MSI (*Normalized Burn Ratio*):

$$NBR = \frac{\rho_{865} - \rho_{10895}}{\rho_{865} + \rho_{10895}} \tag{40}$$

Para una zona determinada, se calcula el NBR antes y después de un incendio forestal y se determina el incremento en el NBR:

$$DNBR = NBR_{pre} - NBR_{pos}$$

en donde los subíndices pre y pos indican las situaciones previas y posteriores al incendio. Valores inferiores a –0,25 indican una revegetación intensa posterior al incendio. Valores entre –0,25 y –0,1 indican baja revegetación. Valores entre –0,1 y 0,1 indican áreas no quemadas. Valores de 0,1 a 0,27 indican baja severidad del incendio. Valores de 0,27 a 0,44 indican severidad de baja a moderada de los efectos del fuego. Valores de 0,44 a 0,66 indican severidad de moderad a alta del fuego. Finalmente, valores superiores a 0,66 indican una alta severidad de los efectos del incendio.

Si no se dispone de información hiperespectral, el índice puede acomodarse a la anchura de banda del sensor TM o ETM+ de Landsat 5 o 7, o sus bandas equivalentes de OLI en el satélite Landsat 8:

$$NBR = \frac{TM4 - TM6}{TM4 + TM6}$$